

VULNERABILIDADE, REABILITAÇÃO E REFORÇO SÍSMICO

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFICADO EM CENTROS URBANOS

Romeu Vicente, Humberto Varum e Anibal Costa
Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro
{romvic, hvarum, agc}@ua.pt

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de reabilitação e renovação urbana, a avaliação do risco sísmico associado ao edificado existente, tradicional de alvenaria ou mais recente em betão armado, deve ser considerada. Em muitos casos, esta avaliação é subavaliada, por um lado pelo reduzido nível de perigosidade de algumas cidades, e por outro pela falta de consciencialização dos responsáveis por estas acções de reabilitação. A inclusão do estudo do risco sísmico num processo de reabilitação urbana deve apoiar-se, por um lado, numa metodologia para a avaliação da vulnerabilidade do edificado integrada numa plataforma de gestão, adaptada à escala de intervenção (quarteirão, centro histórico, área urbana), ao tipo de edificado e ao nível de detalhe da informação recolhida, e por outro numa avaliação rigorosa da perigosidade (ver Figura 1).

2. VULNERABILIDADE DO EDIFICADO EXISTENTE

Para entendimento da vulnerabilidade sísmica do edificado dos centros urbanos é fundamental compreender o processo cronológico

da construção, nomeadamente a relação entre edifícios adjacentes, que normalmente partilham paredes meeiras, com pronunciada heterogeneidade de soluções e qualidade construtiva, sobre as quais se apoiam pavimentos e coberturas. Por outro lado, as fachadas principais destes edifícios, tipicamente paralelas à rua, na maioria dos casos não apresentam boas condições de ligação às paredes adjacentes. Em muitos centros históricos europeus, uma grande parte do edificado foi construído até meados do séc. XX, sem características sísmo-resistentes. São excepção edifícios como monumentos, igrejas, etc., que pela sua importância histórica e cultural têm motivado estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica.

Em muitos centros urbanos, a coexistência e interacção entre edifícios de alvenaria e edifícios de betão armado é outro aspecto que influencia profundamente a vulnerabilidade. Nesta perspectiva, os edifícios não devem ser analisados para acções sísmicas como unidades independentes, mas sim considerando a interacção com os edifícios adjacentes. Deste modo, a vulnerabilidade sísmica dos centros históricos deve ser avaliada a nível global, por exemplo à escala do quarteirão, considerando o seu crescimento, a interacção entre edifícios



> 1

> Figura 1: Áreas urbanas densamente edificadas.

adjacentes e a qualidade das ligações entre estes que poderá influenciar a sua vulnerabilidade de forma negativa ou positiva [1].

3. FRAGILIDADES ESTRUTURAIS COMUNS EM EDIFÍCIOS

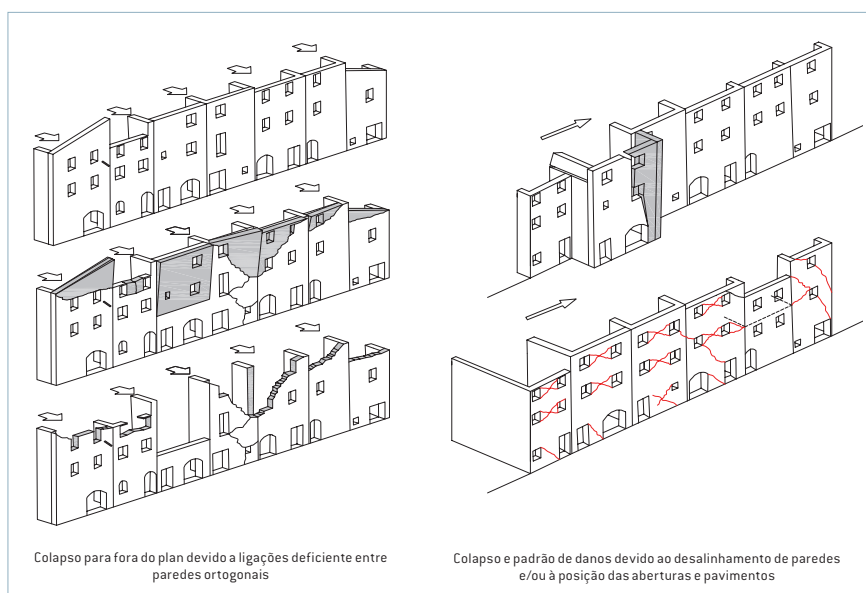
Na avaliação das fragilidades dos edifícios, de alvenaria ou de betão armado, dever-se-á ter em atenção o seu valor patrimonial, a sua função e a sua tipologia construtiva. De facto, cada edifício, em função da sua geometria, quer seja de alvenaria ou de betão armado, têm associado mecanismos de comportamento e potenciais fragilidades muito características [1].

3.1 Edifícios de alvenaria

Para as estruturas de alvenaria resistente os aspectos que mais comumente influenciam a sua vulnerabilidade podem ser classificadas em 4 grupos. O primeiro grupo está associado às fragilidades do próprio sistema resistente, tais como: i) qualidade, constituição e morfologia das alvenarias (homogeneidade, forma, dimensão e natureza do material constituinte, configuração do assentamento, arranjo da alvenaria e tipo de ligação transversal entre panos da própria parede) - (ver Figura 2); ii) distribuição de paredes resistentes e grau de ligação entre paredes ortogonais (ver Figura 3); iii) defeitos construtivos ou deformações excessivas (desaprumo das paredes que introduzem efeitos de segunda ordem); iv) problemas associados à topografia da envolvente do edifício (pendente excessiva do terreno), tipo e consistência do terreno de fundação, fundações inadequadas ou fundações adjacentes a profundidades pronunciadamente distintas, e impulsos de terras sobre as paredes. Dentro deste primeiro grupo realça-se a disposição e distribuição em planta das paredes resistentes e o seu travamento, particularmente das paredes periféricas das construções, uma vez que o tipo de ligação entre paredes ortogonais e a distância entre paredes governam



> 2



> 3

o risco de potenciais mecanismos de colapso das paredes para fora do seu plano. Como a maioria dos edifícios de alvenaria em centros históricos são em banda, é particularmente importante a análise das paredes de fachada que geralmente não se encontram bem ligadas às paredes meeiras.

O segundo grupo concentra-se essencialmente nas fragilidades associadas à interacção entre construções vizinhas e às irregularidades estruturais: i) inserção e posição no agregado urbano; ii) irregularidades em planta e em altura (ver Figura 4); iii) área de aberturas nas paredes e o seu desalinhamento (vertical e horizontal); iv) efeito *pounding* entre construções vizinhas.

3.2 Edifícios de betão armado

Relativamente aos edifícios de betão armado, os efeitos ou mecanismos que tipicamente conduzem ao seu colapso ou à instalação de danos severos, quando sujeitos à acção sísmica, surgem associadas a (ver Figura 5) - [2]: i) confinamento inadequado; ii) ductilidade insuficiente; iii) mecanismos de aderência aço-betão; iv) incorrecta amarração e/ou sobreposição da armadura principal; v) insuficiente capacidade resistente ao corte de vigas e pilares; vi) insuficiente capacidade resistente à flexão de vigas e pilares; vii) insuficiente capacidade resistente dos nós viga-pilar; viii)

> Figura 2: Exemplos de alvenaria com diferente constituição, assentamento e aparelho.

> Figura 3: Interação entre edifícios contíguos e mecanismos de dano.

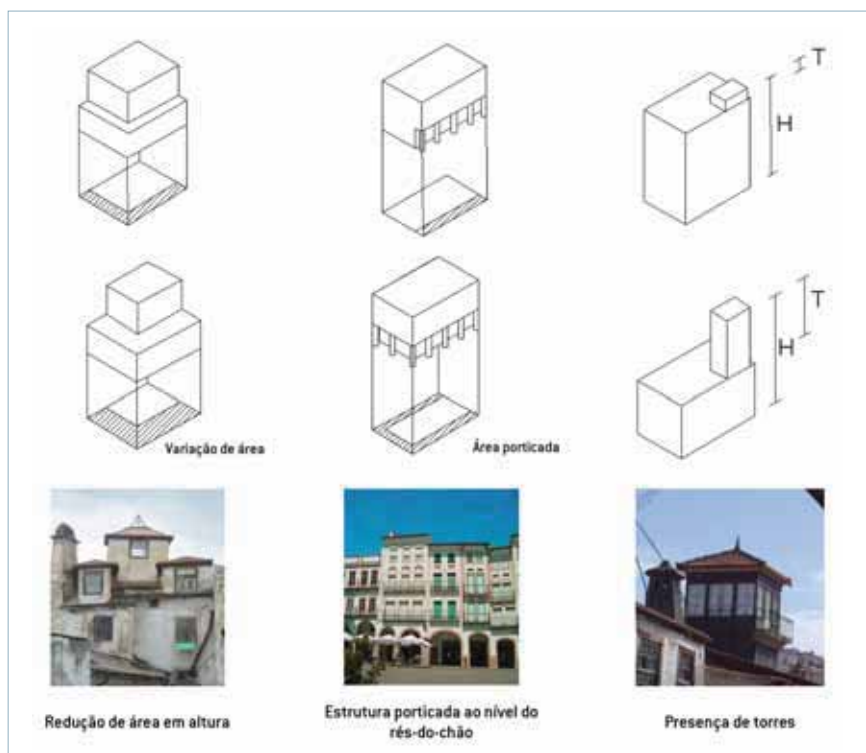
mecanismo tipo viga-forte/pilar-fraco; ix) não consideração da influência das paredes de alvenaria na resposta sísmica dos edifícios; x) irregularidades estruturais em planta e/ou em altura; xi) influência dos modos superiores.

O mecanismo de aderência aço-betão assume um papel fundamental no comportamento das estruturas quando submetidas à acção sísmica, podendo alterar o seu período fundamental de vibração, diminuir a capacidade de dissipação de energia e alterar a distribuição global de esforços internos na estrutura.

Tipicamente, as paredes de alvenaria de enchimento não são consideradas no dimensionamento das estruturas porticadas, nem da verificação da segurança das estruturas existentes. Mesmo sendo elementos relativamente frágeis, as paredes de alvenaria de enchimento podem modificar drasticamente a resposta da estrutura dos edifícios, atraindo forças para partes da estrutura que não foram projectadas para resistir a estas solicitações [2, 3]. É incorrecto assumir que os painéis de alvenaria são sempre benéficos para a resposta global das estruturas de edifícios. De facto, a contribuição das paredes para a resposta sísmica dos edifícios pode ser positiva ou negativa, dependendo de um elevado número de parâmetros.

4. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA E GESTÃO DO RISCO

As metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica podem ser agrupadas em três categorias, de acordo com o seu nível de detalhe, escala de operacionalidade e recursos disponíveis [1]. As de primeiro nível (*first level approaches*) usam um nível considerável de informação qualitativa, são ideais para uma avaliação à escala de centros urbanos, desenvolvendo-se com recursos limitados. As de segundo nível (*second level approaches*) são baseadas em modelos mecânicos sustentados por informação de melhor qualidade, nomeadamente no que diz respeito a aspectos construtivos, caracterização dos materiais e



> 4



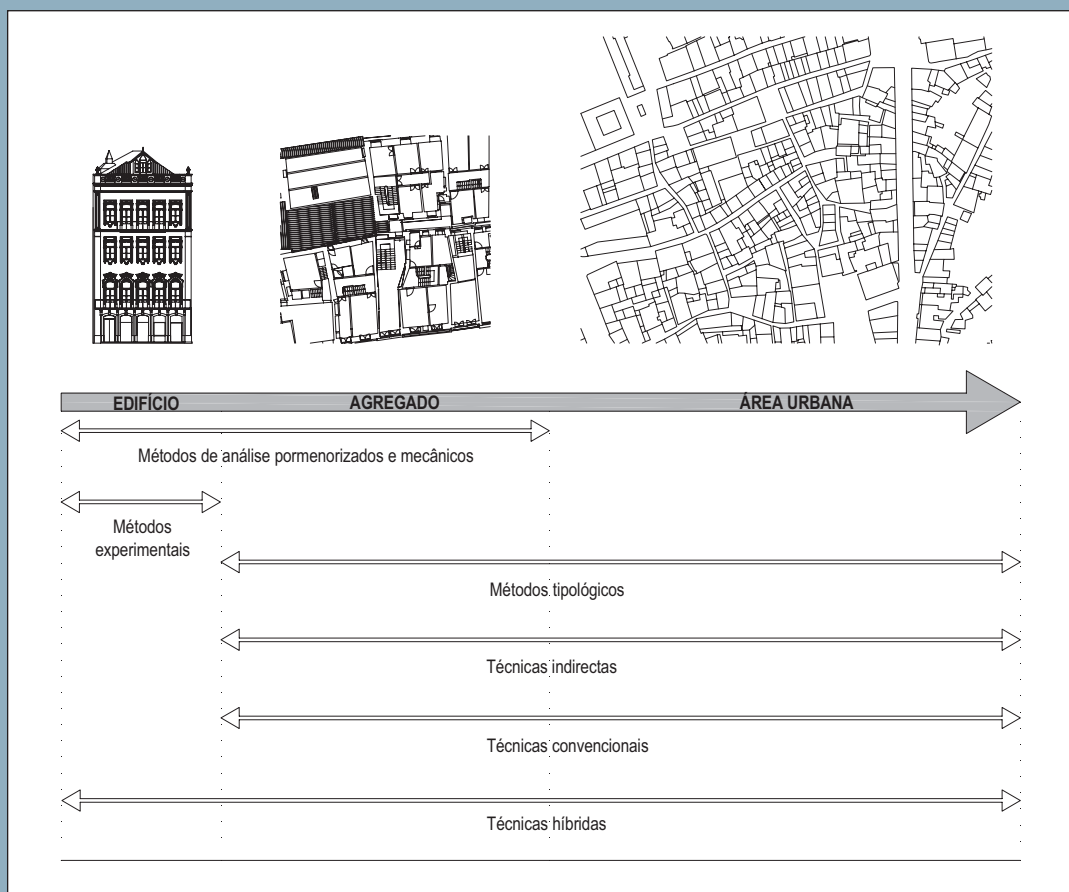
> 5

fundamentalmente de informação geométrica rigorosa. Por último, um terceiro nível (*third level approaches*) que recorre à modelação numérica rigorosa, exige uma detalhada inspecção e caracterização da construção. A escala de operacionalidade condiciona a escolha da metodologia de avaliação. Uma proposta de relação das várias metodologias em função da escala de avaliação da vulnerabilidade sísmica pretendida é apresentada na Figura 6.

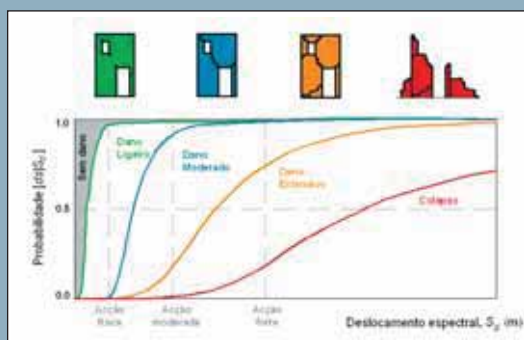
Relativamente às formas de quantificação da vulnerabilidade estas são essencialmente cinco, que permitem estimar os danos de modo directo ou indirecto. Os índices ou classes de vulnerabilidade permitem estimar, de forma relativa, a maior ou menor propensão de uma estrutura sofrer dano, enquanto que as matrizes de probabilidade de dano, as funções de vulnerabilidade e as curvas de fragilidade indicam uma relação explícita que permite estimar de forma directa os danos estruturais

> Figura 4: Irregularidades em altura.

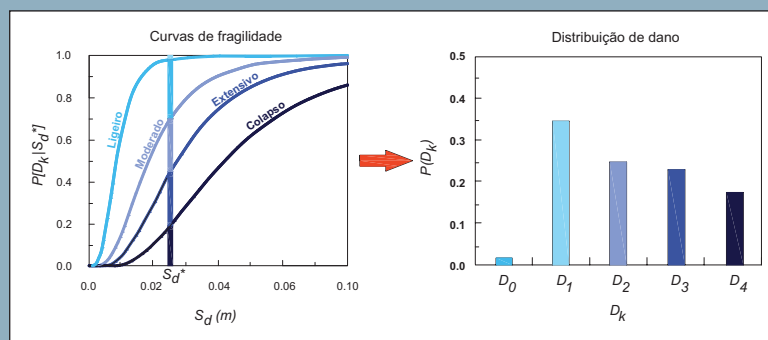
> Figura 5: Fragilidades de estruturas de betão armado.



> 6



> 7



> 8

para diferentes níveis da acção sísmica. Na Figura 7 observa-se um exemplo de curvas de fragilidade, onde se visualizam os limites dos estados de dano (sem dano, dano ligeiro, dano moderado, dano extensivo e colapso) e as probabilidades associadas a um determinado nível de deslocamento espectral dado pela resposta da estrutura. A partir das curvas de fragilidade podem-se obter histogramas de probabilidade de dano em correspondência com os diferentes estados de dano (ver Figura 8).

A gestão de risco dos centros urbanos pode apoiar-se em ferramentas informáticas multi-propósito de análise espacial como os Sistemas

de Informação Geográfica (SIG), associadas a bases de dados relacionais, criando um aplicativo multidisciplinar com capacidade de relacionar e gerir informação, como por exemplo: características construtivas, identificação e classificação do valor patrimonial, vulnerabilidade do edificado, grau de degradação e necessidades de reabilitação, estimativa de danos e custos, avaliação de riscos e planos de acções de evacuação e resgate em caso de uma eventual catástrofe sísmica. Na Figura 9 são apresentados exemplos de *output* da aplicação desenvolvida no âmbito do processo de avaliação da vulnerabilidade e gestão de risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra.

5. MEDIDAS DE MELHORIA DO COMPORTAMENTO E REFORÇO ESTRUTURAL

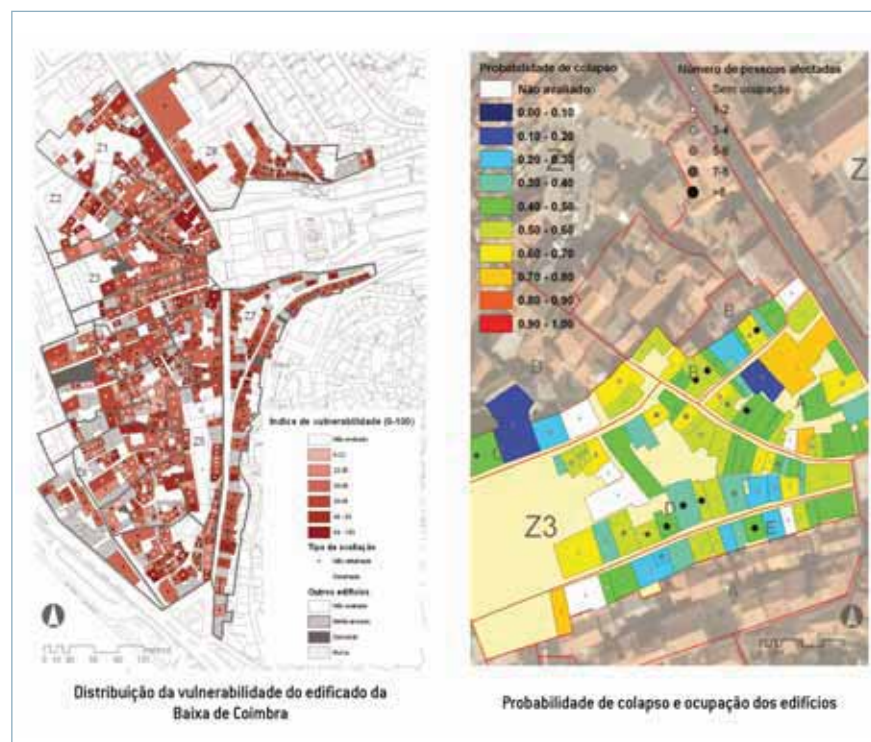
5.1 Edifícios de alvenaria

As intervenções estruturais para melhorar o desempenho dos edifícios tradicionais de alvenaria face às acções sísmicas deverão respeitar a concepção, materiais e soluções construtivas originais do edifício. De entre as estratégias de reforço para construções de alvenaria, destacam-se as seguintes: uso de tirantes; tarugamento dos pavimentos; e consolidação das paredes de alvenaria (ver Figura 10).

> Figura 6: Métodos de análise da vulnerabilidade sísmica.

> Figura 7: Exemplo de curvas de fragilidade e estados de dano [1].

> Figura 8: Curvas de fragilidade e distribuição de dano.



> 9

Tal como referido anteriormente, as paredes de alvenaria da envolvente dos edifícios são altamente vulneráveis, manifestando frequentemente mecanismos de colapso para fora do seu plano. A introdução de tirantes ao nível dos pisos e especialmente ao nível da cobertura pode ajudar a reduzir esta vulnerabilidade [4].

A rigidificação dos pavimentos no seu próprio plano, materializada pela introdução de elementos de madeira diagonais e ortogonais ao vigamento original, com propriedades e dimensões semelhantes a estes, poderá ajudar a travar as paredes, melhorando o desempenho global dos edifícios.

Uma outra solução de reforço passa pela melhoria da resistência das paredes através da sua consolidação, que tipicamente poderá envolver as seguintes acções: picagem do reboco original, passagem de ligadores transversais, refechamento de juntas e enchimento de vazios, e aplicação de uma rede de aço inox em ambas as faces da parede, que são posteriormente argamassadas.

5.2 Edifícios de betão armado

As estratégias de melhoramento do comportamento ou reforço das estruturas de betão armado podem ser associadas em dois grandes grupos [2]: i) intervenções a nível global da estrutura; e, ii) reforço de elementos estruturais isolados. As estratégias de reforço das estruturas a nível local serão adequadas se, por um lado, a maioria dos seus elementos não estiverem muito danificados e tiverem características de resistência e ductilidade adequadas e se, por outro lado, a estrutura tiver globalmente um bom comportamento para solicitações cíclicas. Para estruturas em que muitos dos seus elementos possuam um deficiente comportamento sísmico, dificilmente as estratégias de reforço a nível local serão suficientes para garantir uma boa resposta destas face a solicitações sísmicas. Contudo, na maioria dos casos, a solução óptima de melhoramento do comportamento sísmico das estruturas de betão armado passa pela combinação de soluções pertencentes a estas



> 10

duas famílias de estratégias.

Como técnicas de reforço global do sistema resistente referem-se: adição de paredes resistentes de betão armado; contraventamentos metálicos (ver Figura 11); isolamento de base; sistemas passivos de dissipação de energia; e, redução de massa nas construções.

Como técnicas de reforço a nível local dos elementos de estruturas de betão armado destacam-se: injeção de resinas epoxy; encamisamento; e, o betão projectado. O encamisamento de elementos de betão armado (pilares, paredes, vigas ou nós viga-pilar) é uma das estratégias de melhoria do desempenho de elementos mais comumente utilizada. Esta técnica é particularmente eficiente no aumento da resistência ao corte e à flexão dos elementos, na melhoria da sua ductilidade e na correcção de deficiências associadas à amarração insuficiente da armadura original. O encamisamento pode ser realizado com recurso a chapas de aço, mantas de fibras de carbono (ver Figura 12), ou por aplicação de uma nova camada exterior de betão armado. A

> Figura 9: Mapeamento da vulnerabilidade e cenários de perda.

> Figura 10: Soluções de reforço de edifícios de alvenaria.



Contraventamento metálico

> 11



Reforço por encamisamento com mantas de fibra de carbono

Aplicação de betão projectado sobre parede

> 12

técnica do betão projectado é frequentemente adoptada em combinação com o encamisamento em betão armado no reforço dos pilares e paredes (ver Figura 12). Consiste na projecção de betão em grandes superfícies de elementos danificados ou a reforçar.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

A gestão do risco deve ser encarada como um processo que engloba uma série de estudos, avaliações e acções de reabilitação que visam reduzir o potencial de perda na ocorrência de um evento sísmico. Um dos mais vulgares produtos finais na implementação de um programa de gestão de risco é a definição de um plano de emergência. Porém, a avaliação do risco sísmico é apenas uma das tarefas, da teia complexa da gestão de risco de um sistema urbano. Trata-se assim, de um exercício de correlação de impactos a várias dimensões, desde a económica, humana, organizacional e cultural, ao nível de cada uma das componentes constituintes de um sistema à escala urbana ou regional.

O desenvolvimento de estudos de avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado, de alvenaria e de betão armado, nas cidades e centros históricos revela-se da maior importância, quer pelo estado de degradação actual do edificado, quer pela sua vulnerabilidade. Como resultado poder-se-ão definir linhas orientadoras para as acções de reforço destes edifícios, nas intervenções de reabilitação.

A nível nacional, não existe nenhum documento com carácter normativo para a definição de uma estratégia de avaliação, verificação da segurança e mitigação do risco sísmico associado ao edificado. O recente documento italiano, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* [5], é um excelente exemplo neste âmbito.

REFERÊNCIAS

- [1] Vicente, R. (2008). *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana*; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal.
- [2] Varum, H. (2003). *Avaliação, reparação e reforço sísmico de edifícios existentes*; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal.
- [3] Costa, A. (1989). *Análise sísmica de estruturas irregulares*; Tese de doutoramento, FEUP, Porto, Portugal
- [4] Neves, F. (2008). *Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da ilha do Faial*; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal.
- [5] Linee Guida (2006). *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*; Dipartimento della Protezione Civile e il Dipartimento per i Beni Culturali e Paesaggistici.

> Figura 11: Soluções de reforço global do sistema resistente.

> Figura 12: Soluções de reforço local de elementos estruturais.